

УДК 621.396.67

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА АНТЕННЫХ РЕШЕТОК МОБИЛЬНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А. В. Богословский, к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

Представлены принципы синтеза антенных решеток, предназначенных для применения в составе мобильных радиотехнических комплексов. Синтез выполняется при заданной топологии приемоизлучающей структуры при установленных связях между параметрами ее конструкции и показателями эффективности излучения (приема) сигналов, заданными на основе требований к радиотехническим комплексам. Его суть заключается в рациональном выборе параметров для реализации компромиссных технических решений с целью достижения требуемых характеристик при ограничениях, устанавливаемых из конструктивного исполнения и типовых условий применения комплексов. Выполнено развитие аналитических методов синтеза антенных решеток. Показано, что при синтезе диаграмм направленности приемоизлучающих структур с контролируемыми в заданных направлениях уровнями для сокращения потерь усиления излучаемых (принимаемых) сигналов наиболее целесообразно использовать методы на основе минимизации диаграммных функционалов. Эффективные процедуры поиска экстремальных значений функционалов реализуются с применением программ электродинамического моделирования типа CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio и Altair FEKO – FEldberechnung bei Korpern mit beliebiger Oberflache.

Цель работы состоит в обосновании принципов и развитии методов синтеза антенных решеток в интересах формирования рационального облика радиотехнических комплексов.

Ключевые слова: мобильный радиотехнический объект, антенная решетка, принципы и методы синтеза антенн, диаграммные функционалы, амплитудно-фазовое распределение токов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-15-24

Введение

Совершенствование тактико-технических характеристик радиотехнических комплексов в условиях постоянно возрастающих требований по мобильности и эффективности выполнения целевых функций включает в себя развитие принципов и методов синтеза их антенных систем. Антенны, являющиеся неотъемлемыми компонентами аппаратуры, в соответствии со своим конструктивным исполнением, как правило, выступают за пределы контура носителя. Поэтому их размещение на борту обуславливает изменение эксплуатационных свойств и способствует расширению перечня демаскирующих признаков комплекса. Кроме того, при компактном расположении на несущей поверхности приемоизлучающие структуры, являющиеся источниками интенсивного вторичного электромагнитного излучения, способны нарушать электромагнитную совместимость и устойчивость работы аппаратуры, определяя необходимость регламентации передачи-приема сигналов по времени и занимаемым полосам частот [1].

С одной стороны, антенные системы, применяемые в составе радиотехнических комплексов, должны обеспечивать пространственно-частотную избирательность передачи-приема волновых процессов [2] и энергетическую доступность объектов информационного взаимодействия при ограничениях на мощность излучения и минимально допустимое для приема и обработки сигналов превышение их уровней относительно спектральной плотности мощности шумов приемных устройств. С другой стороны, массогабаритные показатели приемоизлучающих структур и питающих (распределительных) линий и фидерных трактов должны обеспечивать рациональное расходование ресурса целевых нагрузок носителей, а

формы и отражательные свойства конструкций – способствовать защите комплексов от обнаружения и распознавания системами дистанционного мониторинга, функционирующими в радиодиапазоне [3, 4].

Наилучшим образом указанные требования, в общем случае носящие противоречивый характер, могут быть выполнены для антенных систем с дискретными приемоизлучающими структурами – антенных решеток. За счет задания управляющих воздействий, корректирующих амплитудно-фазовое распределение токов антенных элементов, возможно усиление сигналов, излучаемых или принимаемых в установленных секторах углов, и формирование локальных экстремумов диаграмм направленности в интересах пространственной режекции помех [2, 5]. При этом в качестве поверхности для размещения решетки, в отличие от апертурных антенн, может выступать корпус носителя, что исключает потребности использования вспомогательных элементов крепления. За счет совмещения распределительных линий и согласующих элементов в единые диаграммообразующие устройства обеспечиваются возможности миниатюризации и снижения энергетических потерь в фидерных трактах [6, 7].

Параметры конструкции антенных решеток находятся при заданной исходя из архитектуры радиотехнического комплекса топологии и предварительно определенных видах антенных элементов [1, 8]. Данная задача решается в соответствии с методологией синтеза, суть которой заключается в композиции взаимосвязей характеристик и параметров конструкций решеток при характеристиках радиотехнического комплекса, заданных в качестве внешних (системных) ограничений, для нахождения значений параметров, реализующих характеристики решеток для обеспечения требуемых функциональных свойств комплексов [2, 9]. Взаимосвязи характеристик антенных решеток с параметрами конструкций устанавливаются по результатам анализа, базирующегося на декомпозиции и установлении закономерностей определенных для исследования процессов излучения (приема) сигналов [6, 9] в соответствии с функциональным предназначением и условиями применения радиотехнических комплексов [10]. Эффективным способом анализа антенных систем, размещаемых на мобильных носителях, является решение краевых задач электродинамики [6, 11, 12] при граничных условиях для суперпозиции полей приемоизлучающих структур и несущих поверхностей, фрагменты которых представляются в виде проводящих или диэлектрических (металлодиэлектрических) тел простой формы [13].

Таким образом, обоснование принципов и развитие методов синтеза антенных решеток в интересах формирования рационального облика радиотехнических комплексов носят актуальный характер.

Принципы синтеза антенных решеток радиотехнических комплексов

Синтез антенных решеток, предназначенных для использования в составе радиотехнических комплексов, следует выполнять в соответствии со следующими базовыми принципами синтеза сложных технических систем.

1. Принцип системности. Исследуемая антенная решетка (приемоизлучающая структура) представляется в виде совокупности элементов с электромагнитными связями через поля вторичного излучения [14] и токи распределительных линий [9]. Расчет токов и полей элементов осуществляется с использованием результатов решения краевых задач при граничных условиях, применяемых для структуры в целом.

2. Принцип множественности моделей. При формализованном математическом описании взаимосвязей между распределением полей и токов антенных элементов отражаются наиболее существенные факторы электромагнитного взаимодействия, определяющие закономерности изменения характеристик решеток при размещении на носителе. Выбор представительного числа факторов достигается за счет рационального построения модели структуры с определенной степенью детализации описания ее характеристик на каждом этапе синтеза.

3. Принцип параметризации. Формализованное математическое описание структуры представляется в виде функциональных взаимосвязей между ее характеристиками, наиболее

существенными для применения в составе радиотехнического комплекса, и параметрами конструкции при наличии варьируемых компонентов распределения токов. За счет вариаций токов по амплитудам и фазам устанавливаются параметры конструкции, реализующие требуемые характеристики антенных решеток.

4. Принцип информационной достаточности. Синтез осуществляется с использованием уравнений, устанавливающих полные взаимосвязи между характеристиками и параметрами конструкции антенных решеток. Эти взаимосвязи определяются на основе корректных физических моделей (при возможной математической некорректности их постановки [12, 13]), отображающих представительное число факторов, влияющих на показатели эффективности излучения (приема) сигналов.

5. Принцип реализуемости. По результатам синтеза из множества альтернатив выбирается конструкция антенной решетки, позволяющая наиболее простым в техническом плане способом обеспечить требуемые характеристики радиотехнического комплекса при установленных ограничениях на массогабаритные, эксплуатационные и другие показатели.

Синтез антенных решеток радиотехнических комплексов

Постановка задачи синтеза антенной решетки осуществляется при заданной топологии и, как правило, сводится к поиску параметров приемоизлучающей структуры на основании критерия, устанавливающего требования к характеристикам пространственно-частотной избирательности излучения (приема) и распределению сигналов в антенных нагрузках.

В большинстве практически важных случаев комплексные амплитуды токов на элементах решеток подчиняются нормальному закону распределения; их фазовые набег распределены по равномерному закону на интервале возможных значений, а абсолютные величины – по закону Рэлея [6]. Синтез решеток проводится при допущении, что диаграммы направленности всех антенных элементов являются идентичными; амплитуды и фазы токов принимаются равными первым моментам их распределений.

При указанных допущениях диаграмма направленности линейной антенной решетки может быть описана выражением [8, 15]:

$$F_0(u, \Phi) = \sum_n A_n^0 e^{ikx_n u + i\phi_n^0}, \quad (1)$$

где A_n^0 – амплитуда; ϕ_n^0 – фаза тока n -го антенного элемента; x_n – его положение на оси решетки; k – волновое число; u – угловая координата, связанная с направлением излучения (приема) сигналов θ соотношением $u = \sin \theta$.

Наиболее простое решение задачи синтеза заключается в нахождении для фиксированного расположения элементов x_n и амплитудного распределения A_n^0 соответствующих фаз токов ϕ_n^0 , при которых формируемая диаграмма направленности максимально приблизится к эталонной диаграмме $F(u)$ на интервале угловых координат $u \in [u_1, u_2]$.

Аналитическое представление диаграммы направленности плоской антенной решетки имеет вид [8, 15]:

$$F_0(u, v, \Phi) = \sum_{n,m} A_{nm}^0 e^{ik(x_n u + y_m v) + i\phi_{nm}^0}, \quad (2)$$

где A_{nm}^0 – амплитуды и ϕ_{nm}^0 – фазы; x_n и y_m – координаты антенных элементов, а ДН зависит от двух углов $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$; θ и φ – углы сферической системы координат и двумерного массива фаз $\Phi = \{\phi_{nm}^0\}$.

Этапы синтеза плоской решетки аналогичны процедуре поиска параметров конструкции линейной приемоизлучающей структуры с тем качественным отличием, что эталонная диаграмма $F(u, v)$ зависит от углов u , v и задается на двумерной области синтеза $(u, v) \in \Omega$.

Формирование диаграммы направленности со специальной формой лепестков в одном угловом измерении уменьшает сложность этапов синтеза плоских решеток до уровня линейных [15].

Согласно предложенной в [6, 15] классификации, методы синтеза антенных решеток можно объединить в две основные группы.

Первую группу составляют методы, основанные на численной минимизации диаграммных функционалов при нахождении амплитудно-фазовых распределений токов. При циклических вычислениях неизвестные параметры распределения находятся параллельно для всех элементов решетки с постоянным итерационным уточнением [6, 15].

Методы синтеза второй группы базируются на нахождении аналитических выражений для фазовых распределений и алгоритмов поэлементного определения фаз, не требующих их параллельного расчета для всех остальных элементов [8, 15 – 18].

Мера близости эталонной $F(u)$ и синтезируемой $F_0(u, \Phi)$ диаграмм направленности антенной решетки устанавливается функционалом $\rho(\Phi)$, представимым одним из следующих выражений [4, 11]:

$$\rho(\Phi) = \max \|F(u) - F_0(u, \Phi)\| \omega(u), \quad (3)$$

$$\rho(\Phi) = \left[\int_{u_1}^{u_2} \|F(u) - F_0(u, \Phi)\|^s \omega(u) du \right]^{1/s} \text{ при } s > 1, \quad (4)$$

$$\rho(\Phi) = \int_{u_1}^{u_2} |F(u) - F_0(u, \Phi)| \omega(u) du, \quad (5)$$

$$\rho(\Phi) = \int_{u_1}^{u_2} \left(|F(u)|^2 - |F_0(u, \Phi)|^2 \right)^2 \omega(u) du. \quad (6)$$

Точность восстановления диаграммы направленности решетки на интервале синтеза $[u_1, u_2]$ регулируется за счет выбора весовой функции $\omega(u)$.

Выражение (1) устанавливает экспоненциальную зависимость диаграммы направленности решетки от фазовых набегов токов на элементах φ_n^0 . Поэтому возможен переход от целевой функции, минимизируемой в пространстве фаз $\Phi \{\varphi_n^0\}$, к минимизации параметров $P \{\rho_n\}$ и $Q \{q_n\}$ при нелинейных ограничениях на области их изменений [15]:

$$\rho_n = \cos \varphi_n^0, \quad q_n = \sin \varphi_n^0, \quad \rho_n^2 + q_n^2 = 1. \quad (7)$$

Выполняя соответствующие замены в функционалах (5) – (6), с учетом (7) находим:

$$\rho(P, Q) = \int_{u_1}^{u_2} |F(u) - F_0(u, P, Q)| \omega(u) du, \quad (8)$$

$$\rho(P, Q) = \int_{u_1}^{u_2} \left(|F(u)|^2 - |F_0(u, P, Q)|^2 \right)^2 \omega(u) du. \quad (9)$$

Решение задачи синтеза на основе диаграммных функционалов сводится к нахождению числовыми (градиентными) методами значений $\Phi \{\varphi_n^0\}$, которые определяют один из локальных минимумов полученного многоэкстремального результата и зависят от выбора начальных значений фаз $\{\varphi_n^0\}$, относительно которых осуществляется итерационное приближение к локальному минимуму [6, 15].

При использовании функционала (8) с нелинейными ограничениями (7), формирование расширенного луча диаграммы направленности решетки сопровождается резким уменьшением коэффициента направленного действия (КНД) пропорционально коэффициенту расширения во второй степени. Если применять функционалы (6) и (9), то достигается линейная зависимость снижения КНД по мере расширения диаграммы направленности решетки [15].

Данный эффект обусловлен тем, что использование (8) приводит к требованию приближения синтезируемой диаграммы к эталонной не только по амплитуде, но и по фазе, в то время как применение (9) накладывает ограничения только на абсолютную величину формируемой диаграммы.

Для выполнения синтеза решеток по критерию (9) наиболее эффективно применяется метод проектируемого градиента [15].

Градиентный метод и являющийся его развитием метод наискорейшего спуска оперируют частными производными целевой функции, которые вычисляются аналитически для дифференцируемых функций либо методом конечных разностей в противном случае. Методы отличаются выбором шага процедуры по мере приближения к экстремальной области [16 – 18].

При большом числе антенных элементов и сложности нахождения диаграмм направленности решеток, расположенных на малогабаритных носителях [10, 11], поиск экстремальных значений функционалов в задачах синтеза целесообразно осуществлять с применением программ электродинамического моделирования типа CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio и Altair FEKO – FEldberechnung bei Korpern mit beliebiger Oberflache. Указанные универсальные платформы с помощью внутренних средств позволяют проводить корректировку амплитуды и фазы на каждом антенном элементе из состава решетки [19, 20].

Для сокращения числа неизвестных величин и уменьшения объема вычислений, производимого для минимизации диаграммных функционалов в процессе численного решения задачи синтеза, необходимо учесть параметрические связи между неизвестными фазами и числом параметров, существенно меньшим числа фаз, и осуществлять минимизацию диаграммных функционалов в пространстве введенных параметров [15].

С применением диаграммного функционала (8) и представления [21]:

$$e^{i\phi_n^0} = \frac{e^{-ikx_n u^{(1)}} + \sum_{l=2}^L \Lambda_{l-1} e^{i\gamma_{l-1} - ikx_n u^{(l)}}}{\left| e^{-ikx_n u^{(1)}} + \sum_{l=2}^L \Lambda_{l-1} e^{i\gamma_{l-1} - ikx_n u^{(l)}} \right|} \quad (10)$$

при фиксации уровней эталонной диаграммы направленности в $L-1$ направлениях $u^{(l)}$, $l = 2, 3, \dots, L-1$, выполняется синтез многолучевых антенных решеток с заданными КНД в направлениях $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(L)}$. Варьируемыми параметрами являются величины $(u^2, \dots, u^L, \Lambda_1, \dots, \Lambda_{L-1}, \gamma_1, \dots, \gamma_{L-1})$.

При контроле эквивалентности эталонного амплитудно-фазового распределения токов и распределения с синтезированными фазами токов эталонная диаграмма $F(u)$ задается комплексными амплитудами $A_n e^{i\varphi_n}$. Амплитудное распределение A_n имеет более сложный для реализации вид, чем распределение токов A_n^0 синтезируемой решетки. Условие приближения эталонной и синтезируемой решеток отождествляется с условием минимизации разностей $A_n e^{i\varphi_n} - A_n^0 e^{i\varphi_n^0}$ для всех элементов решетки. В приближении малых периодов изменения фаз токов усреднение производится по парам соседних антенных элементов [6, 15]:

$$A_n^0 e^{i\varphi_n^0} = (A_n^0 e^{i\varphi_n^0} + A_{n+1}^0 e^{i\varphi_{n+1}^0}) / 2. \quad (11)$$

Необходимо учитывать, что ввиду быстрых колебаний фаз для токов характерно медленное изменение амплитудных функций, удовлетворяющее требованиям [15]:

$$\begin{aligned} |A_n - A_{n-1}| / A_n &\ll 1, \\ |A_n^0 - A_{n-1}^0| / A_n^0 &\ll 1, \\ |\varphi_n - \varphi_{n-1}| &\ll 1, \\ A_n / A_n^0 &\leq 1. \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$e^{jy_{l-1}} = F(k_l) |F(k_l)| / |F(k_1)|, \quad (15)$$

$$|F(k_l)|^2 = \rho_{l-1} |F(k_1)|^2, \quad l = 2, 3, \dots, L, \quad (16)$$

k_l – волновые векторы, задающие направления максимумов лучей; ρ_{l-1} – уровни этих лучей, нормированные на максимум первого луча; r_{nm} – вектор положения антенного элемента с номером nm ; $F(k_l)$ – значение диаграммы в направлении l -го луча; Λ_{l-1} и y_{l-1} – неизвестные, определяемые из (14) – (16).

Распределение фазовых набегов токов антенной решетки при синтезе диаграммы направленности конического типа с максимумом КНД в направлении $\Theta = \Theta_0$ относительно нормали к раскрыву находится в классе функций

$$\psi_\rho(r/R) = \rho y + \pi/2 (1 - \text{sign}(J_\rho(W_0 r/R))), \quad (17)$$

где y и r – соответственно азимутальная и радиальная координаты точки наблюдения на раскрыве; R – радиус раскрыва; $W_0 = k R \sin \Theta_0$; ρ – целочисленный индекс функции Бесселя $J_\rho(Z)$, при котором КНД максимально.

Синтез расширенной диаграммы направленности антенной решетки с круглым раскрывом, обеспечивающей отсутствие нуля в направлении $\Theta_0 = 0$ при минимальных потерях КНД, проводится с использованием выражения (17), которое при $\rho = 0$ принимает вид [6, 15]:

$$\psi_0(r/R) = \pi/2 (1 - \text{sign}(J_0(r/R))). \quad (18)$$

Фазовое распределение $\psi_0(r/R)$ на круглой апертуре радиуса R с распределением амплитуд токов, характеризуемым осевой симметрией [15]:

$$\psi(r/R) = \pi/2 (1 - \text{sign}(1/b + J_0(W_0 r/R))). \quad (19)$$

Выражение (19) отличается от (18) наличием слагаемого $1/b$, где b – константа, определяемая из уравнения [15]

$$\frac{\int_0^1 A(\rho) \text{sign}(1/b + J_0(W_0 \rho)) J_0(W_0 \rho) \rho d\rho}{\left| \int_0^1 A(\rho) \text{sign}(1/b + J_0(W_0 \rho)) \rho d\rho \right|} = a,$$

где $A(\rho)$ – амплитудное распределение антенны; $\rho = r/R$; a – требуемый уровень лепестка в направлении Θ_0 .

Распределение амплитуд токов антенных элементов в (19) может быть найдено методом неопределенных множителей Лагранжа [6, 8]. Синтезируемые распределения $\psi(r/R)$ имеют вид противофазных колец [15].

Заключение

Обобщение передовых достижений теории антенн и использование базовых принципов синтеза позволяют получить аналитические методы синтеза антенных решеток для мобильных радиотехнических комплексов. Синтез выполняется при заданной топологии приемопередающей структуры при установленных связях между параметрами ее конструкции и показателями эффективности излучения (приема) сигналов, заданными на основе требований к комплексам. Особенность решения данной задачи заключается в сложных зависимостях показателей направленности от параметров конструкции решетки и характеристик вторичного излучения несущей поверхности, а также необходимости учета большого числа противоречивых факторов, определяющих нормальные условия работы радиотехнических комплексов. Суть синтеза решетки заключается в рациональном выборе параметров конструкции, позво-

ляющих обеспечить требуемые свойства с учетом возможностей конструктивного исполнения приемноизлучающей структуры и условий излучения (приема) сигналов при применении комплекса.

Синтез антенных решеток, являющихся компонентами сложных технических систем, следует осуществлять в соответствии с принципами системности, множественности моделей, параметризации, информационной достаточности и реализуемости.

При формировании диаграмм направленности антенных решеток с контролируемыми в заданных направлениях уровнями для наибольшего усиления излучаемых (принимаемых) сигналов целесообразно использовать методы минимизации диаграммных функционалов. Качество воспроизведения эталонной диаграммы направленности для линейных и плоских решеток в статистических методах улучшается с ростом числа элементов. Для решеток с небольшим числом элементов следует использовать методы численной минимизации диаграммных функционалов, позволяющих получить существенно меньшие потери КНД. Статистический синтез целесообразно применять для ограниченной корректировки начальных диаграмм или при синтезе диаграмм специальной формы, когда при работе радиотехнического комплекса допускается снижение КНД решетки. Процедуры поиска экстремальных значений функционалов реализуются в программах электродинамического моделирования типа CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio и Altair FEKO – Felddberechnung bei Korpern mit beliebiger Oberflache.

Библиографический список

1. Тимошенко А.В., Разиньков С. Н., Разинькова О. Э., Громов Р. В. Современное состояние и задачи совершенствования методических основ построения антенных решеток беспилотных радиотехнических комплексов // Воздушно-космические силы: теория и практика. 2020. № 14. С. 63-83.
2. Антенны. Современное состояние и проблемы / под ред. Л. Д. Бахраха и Д. И. Воскресенского. М.: Советское радио, 1989. 124 с.
3. Михайлов Г. Д., Воронов В. А. Перспективы и направления работ по созданию малозаметных антенн бортовых радиоэлектронных комплексов // Оборонная техника. 1995. № 12. С. 35-37.
4. Разинькова О. Э. Основные направления развития базовых технологий радиолокационной разведки и снижения заметности объектов // Воздушно-космические силы: теория и практика. 2021. № 19. С. 96-108.
5. Неганов В. А., Табаков Д. П., Яровой Г. П. Современная теория и практические применения антенн. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.
6. Неганов В. А., Ключев Д. С., Табаков Д. П. Устройства СВЧ и антенны. Часть I. Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ / под ред. В. А. Неганова. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 608 с.
7. Неганов В. А., Ключев Д. С., Табаков Д. П. Устройства СВЧ и антенны. Часть II. Теория и техника антенн / под ред. В. А. Неганова. М.: Ленард, 2014. 728 с.
8. Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Радио и связь, 1974. 232 с.
9. Разинькова О. Э. Двухэтапный синтез антенной решетки с заданной диаграммой направленности и минимальной эффективной площадью рассеяния // Воздушно-космические силы: теория и практика. 2021. № 18. С. 108-119.
10. Резников Г. Б. Антенны летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1967. 416 с.
11. Шатраков Ю. Г., Ривкин М. И., Цымбаев Б. Г. Самолетные антенные системы. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
12. Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. В. А. Неганова и С. Б. Раевского. М.: Радио и связь, 2005. 648 с.
13. Малушков Г. Д. Методы решения задач электромагнитного возбуждения тел вращения // Известия вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. № 11. С. 1563-1589.
14. Лавров Г. А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Советское радио, 1975. 128 с.
15. Кашин В. А. Методы фазового синтеза антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 47-60.

16. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
17. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
18. Витязев В.В. Многоскоростная обработка сигналов: монография. М.: Горячая Линия-Телеком, 2018. 336 с.
19. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2011. 155 с.
20. Банков С. Е., Грибанов А. Н., Курушин А. А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. М.: One-Book, 2013. 423 с.
21. Кюн Р. Микроволновые антенны (антенны сверхвысоких частот): пер. с немецкого // под ред. М. П. Долуханова. М.: Судостроение, 1967. 517 с.
22. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М.: Советское радио, 1969. 467 с.

UDK 621.396.67

ANALYTICAL METHODS TO SYNTHESIZE ANTENNA ARRAYS OF MOBILE RADIO ENGINEERING COMPLEXES

A. V. Bogoslovsky, Ph.D. (Tech.), associate professor, deputy head of the department of radio electronics, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

The principles of antenna arrays synthesis intended to be used as part of mobile radio engineering complexes are presented. Synthesis is performed at a given topology of the receiving-emitting structure with established relationships between the parameters of its structure and the efficiency indicators of signal radiation (reception) set on the basis of the requirements for radio engineering complexes. Its essence lies in the rational choice of parameters for the implementation of compromise technical solutions to achieve the required characteristics under the constraints established from the design and typical conditions of complexes application. The development of analytical methods for the synthesis of annular lattices has been carried out. When synthesizing radiation patterns of receiving-emitting structures with the levels controlled in specified directions and in order to reduce the amplification losses of the emitted (received) signals, the methods based on minimizing diagram functionals are shown to be most expedient. Efficient procedures to find extreme values of functionals are implemented using electrodynamic modeling packages (programs) such as CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio and Altair FEKO – FEldbe-rechnung bei Korpern mit be-liebiger Oberflache.

The aim of the work is to substantiate the principles and to develop methods for the synthesis of antenna arrays in the interests of forming rational appearance of radio engineering complexes.

Key words: optimization coding theory, quick look codes, Viterbi algorithm, multithreshold decoding algorithm, main theorem of multithreshold decoding, optimal decoder, codes with multiple rates, modeling.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-15-24

References

1. Timoshenko A. V., Razin'kov S. N., Razin'kova O. Je., Gromov R. V. Sovremennoe sostojanie i zadachi sovershenstvovaniya metodicheskikh osnov postroeniya antennoy reshetok bespilotnykh radiotekhnicheskikh kompleksov. *Vozdushno-kosmicheskie sily: teorija i praktika*. 2020, no. 14. pp. 63-83. (in Russian).
2. *Antenny. Sovremennoe sostojanie i problemy* / Pod red. L. D. Bahraha i D. I. Voskresenskogo. М.: Sovetskoe radio, 1989. 124 p. (in Russian).
3. Mihajlov G. D., Voronov V. A. Perspektivy i napravleniya rabot po sozdaniyu malozametnykh antennoy bortovykh radioelektronnykh kompleksov. *Oboronnaya tekhnika*. 1995, no. 12, pp. 35-37. (in Russian).
4. Razin'kova O. Je. Osnovnye napravleniya razvitiya bazovykh tekhnologiy radiolokacionnoy razvedki i snizheniya zametnosti ob'ektov. *Vozdushno-kosmicheskie sily: teorija i praktika*. 2021, no. 19, pp. 96-108. (in Russian).
5. Neganov V. A., Tabakov D. P., Jarovoj G. P. *Sovremennaya teorija i prakticheskie primeneniya anten*. Moscow: Radiotekhnika, 2009. 720 p. (in Russian).

6. **Neganov V. A., Kljuev D. S., Tabakov D. P.** *Ustrojstva SVCh i anteny. Chast' I. Proektirovanie, konstruktivnaja realizacija, primery primenenija ustrojstv SVCh / Pod red. V.A. Neganova.* Moscow: Knizhnyj dom «Librokom», 2013. 608 p. (in Russian).
7. **Neganov V. A., Kljuev D. S., Tabakov D. P.** *Ustrojstva SVCh i anteny. Chast' II. Teorija i tehnika antenn / Pod red. V.A. Neganova.* M.: Lenard, 2014. 728 p. (in Russian).
8. **Bahrah L. D., Kremeneckij S. D.** *Sintez izluchajushhih sistem (teorija i metody rascheta).* Moscow: Radio i svjaz', 1974. 232 p. (in Russian).
9. **Razin'kova O. Je.** Dvuhjetapnyj sintez antennoj reshetki s zadannoju diagrammoju napravlenosti i minimal'noj jeffektivnoj ploshhad'ju rassejanija. *Vozdushno-kosmicheskie sily: teorija i praktika.* 2021, no. 18, pp. 108-119. (in Russian).
10. **Reznikov G. B.** *Anteny letatel'nyh apparatov.* Moscow: Sovetskoe radio, 1967. 416 p. (in Russian).
11. **Shatrakov Ju. G., Rivkin M. I., Cymbaev B. G.** *Samoletnye antennye sistemy.* Moscow: Mashinostroenie, 1979. 184 p. (in Russian).
12. *Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / Pod red. V. A. Neganova i S. B. Raevskogo.* Moscow: Radio i svjaz', 2005. 648 p. (in Russian).
13. **Malushkov G. D.** Metody reshenija zadach jelektromagnitnogo vozbuzhdenija tel vrashhenija. *Izvestija vuzov. Radiofizika.* 1975, vol. 18, no. 11, pp. 1563-1589. (in Russian).
14. **Lavrov G. A.** *Vzaimnoe vlijanie linejnyh vibratornyh antenn.* Moscow: Sovetskoe radio, 1975. 128 p. (in Russian).
15. **Kashin V. A.** Metody fazovogo sinteza antennyh reshetok. *Zarubezhnaja radiojelektronika. Uspehi sovremennoj radiojelektroniki.* 1997, no. 1, pp. 47-60. (in Russian).
16. **Uidrou B., Stirnz S.** *Adaptivnaya obrabotka signalov.* Moscow: Radio i svjaz', 1989. 440 p. (in Russian).
17. **Monzingo R. A., Miller T. U.** *Adaptivnye antennye reshetki.* Moscow: Radio i svjaz', 1986. 448 p. (in Russian).
18. **Vityazev V. V.** *Mnogoskorostnaya obrabotka signalov: monografiya.* Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2018. 336 p. (in Russian).
19. **Kurushin A. A., Plastikov A. N.** *Proektirovanie SVCh ustrojstv v srede CST Microwave Studio.* M.: MJeI, 2011. 155 p. (in Russian).
20. **Bankov S. E., Griбанov A. N., Kurushin A. A.** *Jelektrodinamicheskoe modelirovanie antennyh i SVCh struktur s ispol'zovaniem FEKO.* M.: One-Book, 2013. 423 p. (in Russian).
21. **Kjun R.** *Mikrovolnovye anteny (anteny sverkhvysokih chastot) / Per. s nemeckogo // Pod red. M.P. Doluhanova.* Moscow: Sudostroenie, 1967. 517 p. (in Russian).
22. **Minkovich B. M., Jakovlev V. P.** *Teorija sinteza antenn.* Moscow: Sovetskoe radio, 1969. 467 p. (in Russian).